

DOI: 10.11779/CJGE201708009

基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究

刘新荣^{1, 2}, 涂义亮^{1, 2}, 王 鹏^{1, 2}, 钟祖良^{1, 2}, 唐文斌³, 杜立兵^{1, 2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;

3. 中铁重庆地铁建设指挥部, 重庆 401120)

摘 要: 土石混合体剪切时存在细观上的颗粒破碎现象, 并对其宏观力学性质产生影响。基于此, 以 4 种含水率的土石混合体为研究对象, 通过室内大型直剪试验和筛分试验, 分析土石混合体剪切后的颗粒破碎特征, 并建立细观颗粒破碎与宏观力学性质的联系, 从而加深对宏观力学性质的认识。研究表明: 土石混合体剪切后的颗粒破碎较明显, 可分为完全剪断型、表面破裂型和表面研磨型 3 类; 颗粒破碎细观上表现为粗粒组含量降低、细粒组含量增加、中等粒组含量波动变化, 统计上表现为级配曲线上移, 宏观上表现为低含水率出现应变软化破坏、高含水率出现应变硬化破坏、中等含水率出现塑性应变破坏、剪应力-剪切位移曲线“跳跃”和强度非线性特征, 本质上是颗粒间接触力作用产生应力集中的结果; 颗粒相对破碎率随着含水率的降低或法向压力的增大而增大; 黏聚力和内摩擦角均随着含水率的增大而呈幂函数规律降低。

关键词: 土石混合体; 直剪试验; 筛分试验; 含水率; 颗粒破碎

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)08-1425-10

作者简介: 刘新荣(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学、地下工程等领域的教学与科研工作。E-mail: liuxrong@126.com。

Particle breakage of soil-rock aggregate based on large-scale direct shear tests

LIU Xin-rong^{1, 2}, TU Yi-liang^{1, 2}, WANG Peng^{1, 2}, ZHONG Zu-liang^{1, 2}, TANG Wen-bin³, DU Li-bing^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Lab of Chinese Education Ministry for

Construction and New Technology of Mountain Cities, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Chongqing Metro

Consturction Headquarters of China Railway, Chongqing 401120, China)

Abstract: In the direct shear tests on soil-rock aggregate (SRA), particle breakage occurs in micro vision, which will influence its macro mechanical properties. On this basis, the laboratory large-scale direct shear tests and sieving analysis tests are conducted for SRA with four kinds of moisture contents. The particle breakage is analyzed based on the test results, and the connection between the micro particle breakage and the macro mechanical properties is established, which can eventually deepen engineers' understanding of macro mechanical properties. The results show that: (1) The particle breakage appears to be obvious after shear tests, which can be divided into three types, i.e. complete-cut type, surface-ruptured type and surface-grinded type; (2) In micro vision, the particle breakage is characterized by decreasing coarse particles, increasing fine particles and fluctuation content of medium particles. In statistics, for the particle breakage, the grading curve is upward and in macro aspect, “jumping” occurs in the shear stress-shear displacement curves, the strength of SRA is of nonlinear characteristics, and the SRA with low, high and medium moisture contents exhibits strained softening, strained hardening and plastic-strain failure models. In fact, the particle breakage results from the stress concentration of particles by touching with each other; (3) Either the decrease of moisture content or the increase of normal pressure will cause the ratio of particles breakage to increase; (4) Both the cohesion and the internal friction angle decrease like power function with the increasing moisture content.

Key words: soil-rock aggregate; direct shear test; sieving analysis test; moisture content; particle breakage

0 引 言

土石混合体是由性质差异悬殊的土和石组成的松散体, 是一类介于土体和岩体之间的特殊地质体^[1-2]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372356); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110191120033); 中央高校基本科研业务费科研专项自然科学基金类项目(CDJZR12200012)

收稿日期: 2016-05-23

土石混合物中的石可包括中砾、粗砾、碎石（卵石）、块石（漂石）。早期的山地城镇建设中，广泛采用“开山填谷”方式，形成了大面积土石混合物回填区。现今大力开发地下空间时不可避免地穿越该区域，其工程建设的安全性和经济性很大程度上取决于该区域土石混合体的力学性质。

土石混合体的力学性质十分复杂，影响因素较多，为此，许多学者^[3-10]通过现场原位试验、室内试验和数值试验进行了深入研究，其研究成果主要集中在砾石含量、砾石形状、岩性及应力状态等因素对土石混合物强度特性的影响规律，但较少考虑含水率的影响。然而，对于绝大多数岩土体而言，含水率往往是影响它们强度特性最为重要的因素之一，为此，李维树等^[11]和邓华锋等^[12]在大量的试验基础上建立了三峡库区土石混合体的强度参数与含水率之间的定量关系。徐文杰等^[13-14]通过大型水平推剪试验研究了虎跳峡的土石混合物分别在天然状态下和浸水条件下的强度特征。王江营等^[15]基于室内直剪试验研究了干湿循环对土石混合物抗剪强度的影响。这些研究成果分析了水对土石混合物强度特性的影响，可为相关工程设计提供参考依据。然而，细观上，颗粒破碎是粒状土体破坏过程中普遍存在的现象，是联系宏观力学性质的重要纽带^[16]。土石混合物中含有粒径差异极大的粒状颗粒，剪切时亦发生颗粒破碎，并对其力学特性产生较大影响。虽然上述文献中部分考虑了颗粒破碎对其力学特性的影响，但主要是从定性的角度分析^[12-13]。

综上，为了更深入研究含水率对土石混合物力学特性的影响，本文以4种含水率的土石混合物为试验对象，通过室内大型直剪试验研究其宏观力学特性随含水率的变化规律，并基于室内筛分试验，定量分析土石混合体的细观颗粒破碎特征，进而从细观层面上的颗粒破碎特征，解释含水率对土石混合体的宏观力学特性的影响。

1 试验设备、材料及方法

1.1 试验设备

试验所用设备主要包括直剪试验机、标准振筛机和电子称等。直剪试验采用四川大学华西岩土研究所研制的ZY50-2G大型粗粒土直剪试验机，仪器主要由刚性框架、剪切盒、水平加载系统、垂直加载系统和数据采集系统等组成，如图1(a)所示。最大垂直输出荷载和最大水平输出荷载可达700 kN，最大水平行程可达120 mm，剪切盒内部尺寸为504.6 mm×400 mm（直径×高度）。通过固定上剪切盒和水平移动下剪切盒，使试样在均匀受力的条件下进行剪切。筛分

试验采用浙江上虞市五四仪器厂生产的标准振筛机，如图1(b)所示。



(a) ZY50-2G 大型直剪试验机

(b) 标准振筛机

图1 主要试验设备

Fig. 1 Main test equipments

1.2 试验材料

本试验所用的土石混合物取自重庆市渝北区某土石混合物回填区，取样点位于该区域的下穿隧道掌子面处，隧道埋深约30 m，主要由粉质黏土和泥质砂岩组成。按照《试验规程》^[17]，通过现场灌水法测得试样天然密度为2.07 g/cm³，如图2所示。



图2 现场灌水法测试样天然密度

Fig. 2 Measuring natural density of samples using field irrigation method

运回试验室后通过烘干法测得天然含水率为9.2%、干密度为1.90 g/cm³。从取回的试样中随机抽取3份，烘干后通过筛分试验测得天然级配曲线，如图3所示。天然级配曲线的平均粒径 $d_{50}=7.66$ mm，不均匀系数 $C_u=56.09$ ，曲率系数 $C_c=3.79$ ，不能同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $1 \leq C_c \leq 3$ 的条件，属于级配不良的土，这与早期山地城镇采用的“开山填谷”建设方式有关，给现今的地铁建设带来较大挑战。目前较多文献^[5~8, 10~12]采用5 mm作为土石混合物中的土和石的粒径界限，本文遂沿用此界限。因此，现场取回的试样含石量 $P_5=59.29\%$ ，含石量相对较高。

根据大型直剪试验的规定，砾石最大粒径不能超过试样高度或直径的1/5倍。本试验试样高度为400 mm，直径为504.6 mm。因此，最大粒径必须小于等于80 mm，本试验中砾石最大粒径取60 mm。对于大

于 60 mm 的颗粒采用等量替代法^[17]进行缩尺, 缩尺后的级配曲线如图 3 所示, 其平均粒径 $d_{50}=7.49$ mm, 不均匀系数 $C_u=51.95$, 曲率系数 $C_c=4.10$, 亦属于级配不良的土。对比天然级配曲线, 缩尺后的含石量 P_5 不变, 但平均粒径 d_{50} 减小 0.17 mm, 不均匀系数 C_u 减小 4.14, 曲率系数 C_c 增大 0.31, 因此, 缩尺后级配曲线的工程性质变差, 这是缩尺试验所带来的不可避免的误差。根据规范, 这种误差是可接受的^[17]。

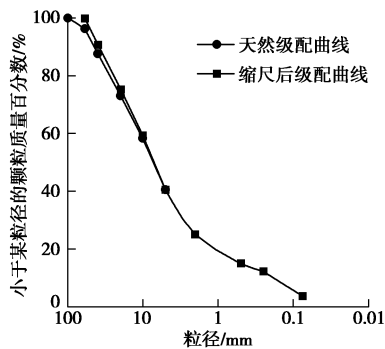


图 3 土石混合体的级配曲线

Fig. 3 Grading curves of SRA

1.3 试验方法

土石混合体的力学特性与砾石含量、砾石形状、岩性、含水率等密切相关。许多学者^[3-10]已经通过室内外试验和数值模拟等方法, 研究了砾石含量、砾石形状、岩性等的影响, 取得了丰富的研究成果。因此, 本文拟在试验中重点考虑含水率的影响。试验对等量替换后的试样设计了 4 种含水率状态: 晾晒后的含水率 (3.4%)、天然含水率 (9.2%)、饱和含水率 (18.6%) 以及介于天然含水率和饱和含水率之间的 1 种含水率 (13.9%)。

为了控制试验只受含水率单一条件的影响, 所有试样采用与取样现场相同的干密度 (1.90 g/cm^3) 和等量替换后的级配曲线 (图 3) 进行重塑。根据设计的含水率和级配曲线, 称取每组重塑样所需的各粒组和

水, 搅拌均匀后用防水膜包裹密封, 闷料 24 h 使水分均匀分布, 再分 3 层装入直剪盒压实。

装样结束并调整仪器后, 进行快剪试验, 剪切速度设定 0.8 mm/min 。由于取样现场隧道埋深约 30 m, 预期最大压力约 600 kPa, 根据《试验规程》^[17]规定, 法向压力分别取 200, 400, 600, 800 kPa。当剪切位移达到试样直径的 1/10 时, 剪切完成。试验完成后, 取剪切面以上厚 60 mm 和以下厚 60 mm 的土石混合体, 烘干后通过筛分定量统计剪切后剪切面的颗粒级配。

2 试验结果及分析

2.1 剪切面观察

图 4 为含水率 13.9% 的试样在 600 kPa 法向压力作用下的剪切破坏面。

由图 4 (a) 可知, 剪切面并非完全光滑, 而是呈现出凹凸不平的形态, 这与土石混合体内部存在的大粒径砾石有关^[12-14]。通过观察发现, 剪切面上的一些砾石出现破碎现象, 归纳起来可分为 3 类: 完全剪断型、表面破裂型和表面研磨型, 分别如图 4 (b)、(c) 和 (d) 所示。图 4 (b) 中的砾石断口新鲜, 且断口面基本与剪切面平行; 通过核对上、下剪切面, 发现两个剪切面上接近对称部位出现相同形状断口的砾石, 该砾石为“完全剪断型”破碎。图 4 (c) 中的块石表面出现了较严重的破裂和摩擦痕迹, 该砾石为“表面破裂型”破碎。图 4 (d) 中的砾石保持较完整, 表面亦有较明显的研磨痕迹, 该砾石为“表面研磨型”破碎。以上 3 种类型的颗粒破碎将不同程度的改变土石混合体的各粒组含量。

2.2 颗粒级配分析

表 1 列出了土石混合体剪切前后的各粒组含量。为了更直观描述表 1 中的变化规律, 以含水率 3.4% 为例, 做剪切前后各粒组含量的直方图, 如图 5 所示。

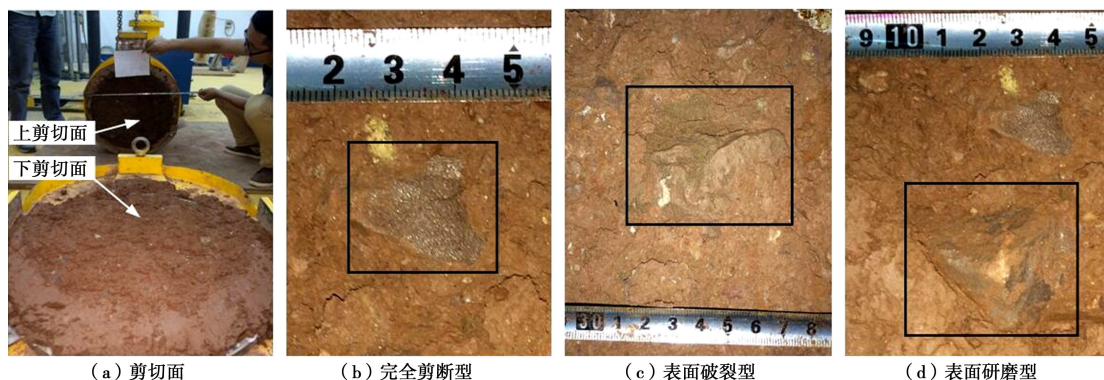


图 4 剪切面颗粒破碎形态图

Fig. 4 Morphology of particle breakage on shear plane

表 1 土石混合体剪切前后各粒组的含量
Table 1 Contents of each grain group before and after shearing

含水率 $w/\%$	法向压力 σ_n/kPa	粒组含量/%									含石量 $P_s/\%$
		40~60	20~40	10~20	5~10	2~5	0.5~2	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075	
3.4	剪切前	9.13	15.35	16.15	18.66	15.43	10.11	2.90	8.52	3.75	59.29
	200	5.27	14.18	15.02	18.40	14.65	10.76	4.40	9.31	8.00	52.87
	400	4.86	10.90	9.83	15.66	13.19	13.26	6.08	13.94	12.26	41.26
	600	3.96	10.53	8.72	12.75	13.03	13.07	7.06	15.26	15.61	35.56
	800	2.34	9.89	8.42	11.42	13.62	13.55	7.40	15.64	17.72	32.08
9.2	200	7.38	14.37	14.63	17.81	14.21	10.39	4.07	9.72	7.41	54.19
	400	5.48	13.31	11.61	15.34	11.47	12.85	6.22	12.07	11.65	45.74
	600	4.73	11.68	10.91	14.26	10.95	12.85	6.67	13.90	14.06	41.58
	800	4.24	11.16	10.51	12.05	11.87	9.62	9.22	14.85	16.48	37.96
13.9	200	7.82	14.47	15.68	17.97	14.27	11.49	4.14	9.01	5.16	55.93
	400	6.39	11.22	11.56	16.04	14.90	17.15	5.38	10.14	7.22	45.21
	600	5.70	9.25	11.26	16.60	16.82	14.59	6.85	10.83	8.10	42.81
	800	5.10	8.01	10.87	17.85	15.84	11.87	7.91	12.95	9.61	41.82
18.6	200	8.55	14.87	15.60	19.45	15.25	8.50	3.97	9.22	4.58	58.48
	400	8.11	13.97	15.43	16.99	15.51	10.06	5.22	9.42	5.30	54.50
	600	7.61	13.05	14.41	16.48	15.50	11.44	5.56	9.90	6.05	51.55
	800	7.35	13.03	14.17	16.39	16.00	9.73	6.17	10.71	6.46	50.93

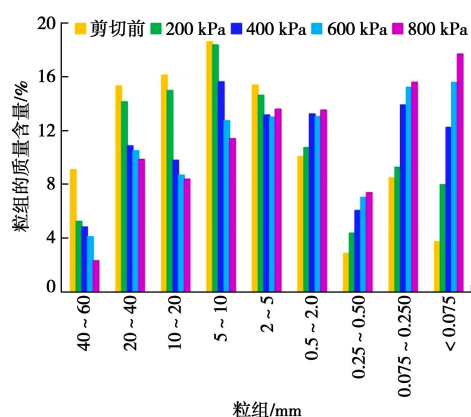


图 5 剪切前后各粒组含量的直方图 (含水率=3.4%)

Fig. 5 Histogram of contents of each grain group before and after shearing (moisture content of 3.4%)

由表 1 和图 5 可知, 排除少部分误差, 总体上剪切后呈现出粗颗粒组 (5~60 mm) 的含量降低, 细颗粒组 (<0.5 mm) 的含量增加, 中等颗粒组 (0.5~5 mm) 的含量波动的变化规律。粒组含量的变化是由颗粒破碎造成的: 剪切作用下, 土石混合体中的粗颗粒由于破碎成更小的颗粒而含量降低; 细颗粒含量相应得到提高; 而中间粒组一方面因为破碎成更小的细颗粒而含量降低, 另一方面因为粗颗粒的破碎而得到补充, 因此, 综合起来中间粒组剪切前后的含量波动变化。

由表 1 可知, 剪切后的含石量 P_s 都不同程度有所

降低, 说明颗粒破碎会使含石量 P_s 降低; P_s 的降低量随着法向压力的增大而增大, 随着含水率的增大而减小。

颗粒破碎将导致级配曲线上移, 破碎程度越高, 上移幅度越大。图 6 为剪切前后的土石混合体的颗粒级配曲线, 其在剪切后都有不同程度的上移, 上移幅度与法向压力、含水率相关。因此, 法向压力和含水率都会对剪切时颗粒破碎的程度产生影响。

2.3 颗粒破碎分析

为了更好地描述颗粒破碎的程度随法向压力和含水率的变化规律, 需要对颗粒破碎的程度进行量化。由于颗粒破碎最直观的表现就是级配曲线的变化, Hardin^[18]根据级配曲线的变化, 提出了相对破碎率 B_r 。他认为粒径小于 0.074 mm 的细颗粒对颗粒破碎的影响不大, 从而将试验前后的级配曲线与粒径为 0.074 mm 的竖线所围成的面积分别定义为初始破碎势 B_{pi} 和最终破碎势 B_{pf} 。上述两者面积之差定义为破碎量 B_t , 即

$$B_t = B_{pi} - B_{pf} \quad (1)$$

由于颗粒破碎势与初始级配有关, 为了消除初始级配的影响, Hardin 定义了相对破碎率 B_r , 即破碎量 B_t 与初始破碎势 B_{pi} 的比值,

$$B_r = \frac{B_t}{B_{pi}} \quad (2)$$

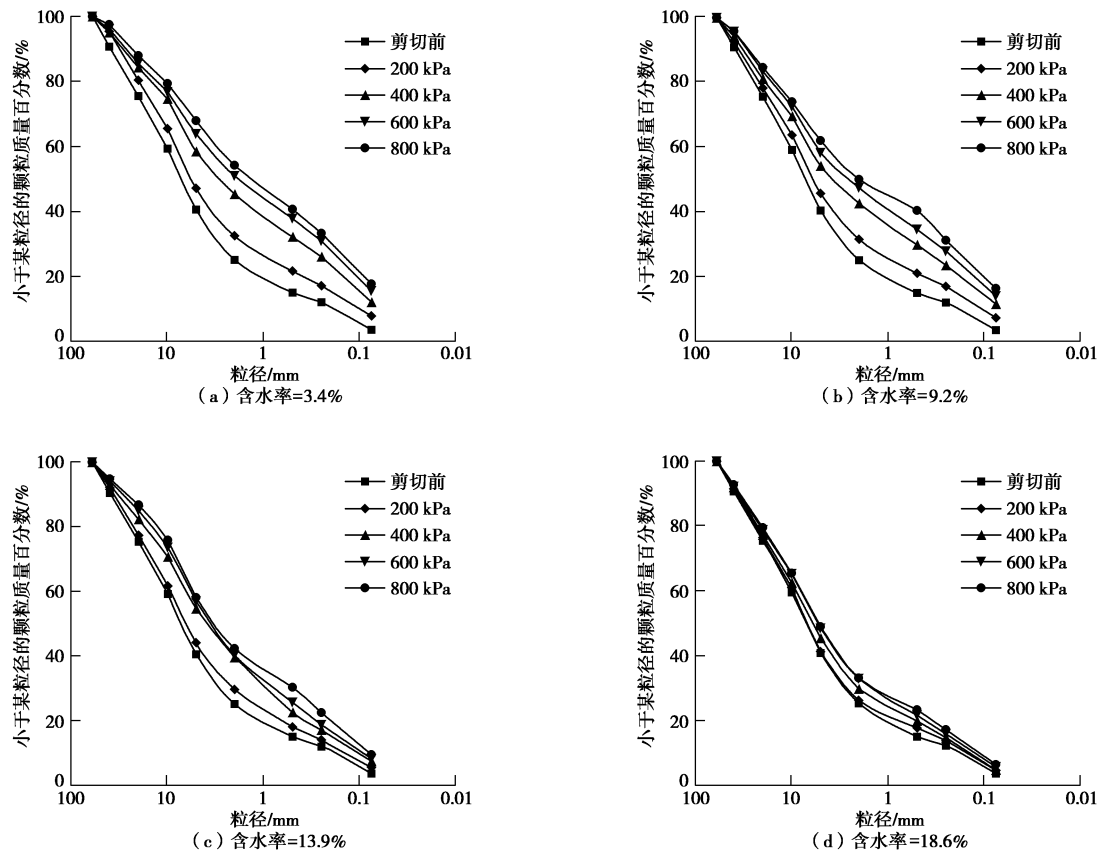


图 6 剪切前后的土石混合体的颗粒级配曲线

Fig. 6 Grading curves of SRA before and after shearing

由于上述相对破碎率 B_r 考虑了所有颗粒粒径的变化, 能够较全面地反应颗粒的破碎情况, 且消除了初始级配的影响, 本文采用 B_r 作为土石混合体的颗粒破碎指标。

图 7 为土石混合体剪切后的相对破碎率 B_r 的试验结果。通过对图 7 中的试验数据进行拟合, 可以发现, 相对破碎率 B_r 与含水率 w 、法向压力 σ_n 满足如下二元函数关系:

$$B_r = \frac{\sigma_n / p_a}{a + b e^{f w} + \sigma_n / p_a}, \quad (3)$$

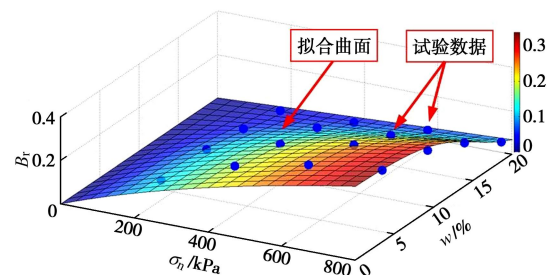
式中, p_a 为大气压强 (101.33 kPa), a , b , f 为拟合参数 ($a=15.38$, $b=0.24$, $f=0.30$)。

拟合曲面的三维图形如图 7 所示, 其相关系数 $R^2=0.93$, 因此, 对于本文所研究的土石混合体, 认定其相对破碎率 B_r 与含水率 w 、法向压力 σ_n 满足式 (3) 的函数关系是合理的。

由图 7 和式 (3) 可发现如下规律:

(1) 当含水率 w 相同时, 随着法向压力 σ_n 增大, 颗粒相对破碎率 B_r 亦增大。颗粒破碎本质上是颗粒间接触力作用产生应力集中的结果, 接触力越大, 越容易发生破碎。法向压力 σ_n 越大, 颗粒间的接触力亦越大, 因此, 剪切时颗粒更容易发生破碎。此外, 法向

压力对试样具有约束作用, 压力越大, 约束作用越强, 造成颗粒间的转动和翻越更难, 从而为颗粒破碎提供了更有利的条件。

图 7 相对破碎率 B_r 与含水率 w 、法向压力 σ_n 的关系Fig. 7 Relationship among B_r , w and σ_n

(2) 当法向压力 σ_n 相同时, 随着含水率 w 的增大, 颗粒相对破碎率 B_r 逐渐减小, 说明水对颗粒破碎具有弱化作用。这主要由两方面原因造成: 一方面, 由于采用快剪试验, 剪切时孔隙水压力难以及时消散, 含水率越高, 孔隙水压力越大, 相应的有效应力越小, 即颗粒间的有效接触力越小, 颗粒越不容易破碎; 另一方面, 含水率越高, 颗粒间的结合水膜厚度越大, 使得水对颗粒间的润滑作用越强, 造成剪切时颗粒容易转动和翻越, 从而易避开破碎的发生。

2.4 剪应力与剪切位移关系曲线分析

(1) 破坏模式分析

通过直剪试验得到的土石混合体剪应力-剪切位移曲线如图8所示。由图可知,含水率对土石混合体的破坏模式具有较大的影响,可归纳为应变软化、塑性应变和应变硬化3种破坏模式。

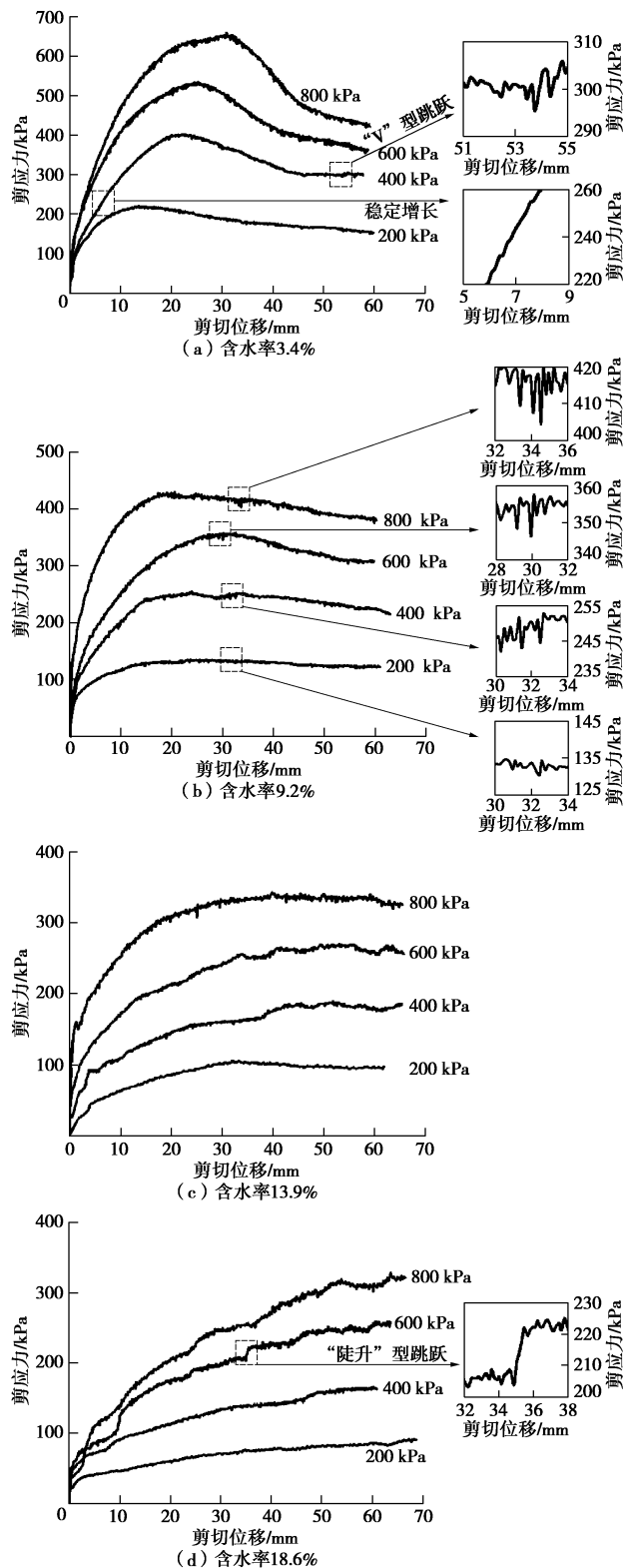


图8 土石混合体剪应力-剪切位移曲线

Fig. 8 Curves of shear stress-shear displacement of SRA

当含水率较低(3.4%)时,表现为应变软化破坏,剪应力-剪切位移曲线主要经历应变硬化、应变软化和残余变形3个阶段,存在峰值剪应力和残余剪切强度,剪切位移达到试样直径的2.97%~5.95%时,剪应力达到峰值。当含水率较高(18.6%)时,出现应变硬化破坏,随着剪切位移的增大,剪应力一直增大,无明显峰值剪应力出现。当含水率中等(9.2%和13.9%)时,试样的破坏模式介于应变软化和应变硬化之间,近似为塑性应变,剪应力-剪切位移曲线主要经历应变硬化和塑性变形两个阶段,无明显峰值剪应力出现。

邓华锋等^[12]亦对4种含水率的土石混合体开展了3种法向压力条件下的直剪试验,结果仅出现塑性应变1种破坏模式,与本文出现3种破坏模式差异较大,但这两者并不矛盾,因为两者所采用的试验条件不同。前者试验中的含水率为8.0%,9.1%,12.0%和15.0%,法向压力为180,270,360 kPa,其含水率和法向压力的变化范围均小于本文试验,相应的与本文试验中含水率9.2%,13.9%,法向压力200,400 kPa的4个试样的试验条件近似。由图8可知,这4个试样近似呈塑性应变破坏模式,与邓华锋等^[12]的试验结果相似,表明本文的试验结果是可以接受的。

作为一种散体材料,土石混合体的破坏模式必然与颗粒的相互作用有关,因而,可以从细观层面上的颗粒破碎对本试验中的不同破坏模式进行解释。

当含水率较高(18.6%)时,由图7和式(3)可知,颗粒相对破碎率 B_r 较小,此时颗粒破碎程度较低,剪切过程中颗粒以转动和翻越为主导。转动和翻越需要一定的剪力提供,从而导致剪应力增大。颗粒间的转动和翻越伴随着整个剪切过程,导致剪应力持续增大,因此,剪应力-剪切位移曲线表现为应变硬化。

当含水率较低(3.4%)时,由图7和式(3)可知,颗粒相对破碎率 B_r 较大,此时颗粒破碎程度较高。颗粒破碎一方面使得存储在颗粒内部的弹性应变能得到释放,另一方面削弱了颗粒间的咬合作用,从而导致剪应力达到峰值后开始降低,相应的剪应力-剪切位移曲线出现软化。当剪应力降低到一定程度时,许多颗粒发生破碎或剪断,形成了一条贯通的剪切面,上下剪切盒土体将沿此剪切面相互滑动,此时剪切进入残余强度阶段,强度大小稳定在一定范围。

当含水率中等(9.2%和13.9%)时,颗粒破碎处于一般水平。此时,颗粒破碎、转动和翻越均对剪切时的破坏模式产生一定影响,综合起来使得土石混合体的破坏模式介于应变软化和应变硬化之间,近似于塑性应变模式。

(2) 曲线“跳跃”现象分析

无论含水率和法向压力多大, 图 8 中的剪应力 - 剪切位移关系曲线的初始段总是稳定增长; 而初始段过后, 曲线开始出现幅度不一的“跳跃”现象。

这种“跳跃”主要是由细观上的颗粒破碎、转动和翻越引起的。剪切位移较小时, 颗粒之间还不足以形成足够的破碎、转动、翻越, 剪切面亦未贯通, 此时的剪切位移主要为试样的剪密和连续体变形, 剪应力和剪切位移都以较稳定的速度增长, 因此, 对应的剪应力 - 剪切位移关系曲线的初始段较光滑, 如图 8 (a)。随着剪切位移的增大, 颗粒间的咬合力因试样被剪密而增大, 在咬合力作用下, 颗粒可能破碎、转动和翻越。当颗粒发生破碎时, 在破碎瞬间, 作用在颗粒上的咬合力将突然释放, 从而导致曲线出现“陡降”, 破碎后的颗粒再次被咬合, 曲线又回升, 从而形成“V”型跳跃^[7], 如图 8 (a); 当颗粒发生转动和翻越时, 需要克服较大的咬合力, 尤其是大粒径颗粒, 从而导致曲线出现“陡升”型跳跃^[7], 如图 8 (d)。徐文杰^[7]和邓华锋^[12]等亦在直剪试验中观察到曲线“跳跃”现象, 且都认为曲线跳跃是由颗粒破碎、转动和翻越引起的。

对比图 8(a)、(b)、(c)和(d), 含水率较低(3.4%)时, 曲线跳跃以“V”型跳跃为主; 含水率较高(18.6%)时, “陡升”型跳跃增多。由图 7 和式 (3) 可知, 低含水率时的颗粒相对破碎率 B_r 较高, 颗粒破碎程度较高; 随着含水率 w 的增大, 颗粒相对破碎率 B_r 降低, 颗粒转动和翻越增多。徐文杰等^[7]认为“V”型跳跃主要由颗粒破碎引起, 而“陡升”型跳跃主要由大粒径颗粒的转动和翻越引起, 这正好解释了图 8 不同含水率时曲线出现不同的跳跃类型。

含水率 w 不变时, 曲线的最大跳跃幅度总体上随着法向压力 σ_n 的增大而增大。例如, 含水率 $w=9.2\%$ 时 (图 8 (b)), 200, 400, 600, 800 kPa 法向压力下的 4 条曲线的最大跳跃幅度分别为 4.4, 8.6, 11.1, 15.5 kPa。因为法向压力越大, 颗粒咬合力越大, 其破碎时释放的咬合力越大, 造成曲线跳跃幅度越大。

2.5 剪切模量变化分析

为了研究土石混合体的剪切变形性质, 借鉴文献 [10] 中的方法, 整理出各组试样的剪切模量 $G_{0.02}$ (剪应变 $\gamma=0.02$ 时的剪切模量 $G_{0.02}$), 如表 2 所示。

表 2 土石混合体的剪切模量 $G_{0.02}$

Table 2 Values of shear modulus $G_{0.02}$ of SRA

(MPa)

含水率 $w/\%$	法向压力 σ_n /kPa			
	200	400	600	800
3.4	10.51	14.93	20.47	23.42
9.2	5.97	10.20	12.75	19.08
13.9	3.25	5.58	8.76	12.71
18.6	2.32	4.63	6.29	7.10

由表 2 可知, 相同含水率的土石混合料的 $G_{0.02}$ 随着法向压力增大而增大, 与文献[13]的试验结果一致。相同法向压力下, $G_{0.02}$ 随着含水率的增大而减小, 说明水对土石混合料的剪切变形性质具有软化作用。

2.6 抗剪强度变化分析

根据《试验规程》^[17]要求, 取剪应力 - 剪切位移关系曲线上的峰值或稳定值作为抗剪强度; 如无明显峰值, 则取剪切位移达到试样直径 10% 处的剪应力作为抗剪强度, 结果如表 3 所示。

表 3 土石混合体的抗剪强度

Table 3 Values of shear strength of SRA

(kPa)

含水率 $w/\%$	法向压力 σ_n /kPa			
	200	400	600	800
3.4	212.1	401.0	534.9	653.8
9.2	125.7	255.4	357.1	430.8
13.9	98.4	214.0	296.8	369.4
18.6	91.5	166.1	220.2	315.0

(1) 线性强度特性

图 9 描绘了表 3 中各组试样的峰值剪应力 τ 与法向压力 σ_n 的关系。由图可知, 含水率 w 相同时, 随着法向压力 σ_n 的增大, 抗剪强度亦增大, 利用线性函数进行拟合, 得到其相关系数 R^2 均大于 0.91, 如表 4 所示。说明土石混合体的强度较符合摩尔库伦准则。法向压力相同时, 随着含水率的增大, 抗剪强度逐渐减小, 说明水对土石混合体的抗剪强度具有软化作用。

表 4 线性函数拟合的相关系数 R^2

Table 4 Values of correlation coefficient R^2 fit by linear function

含水率 $w/\%$	3.4	9.2	13.9	18.6
相关系数 R^2	0.91	0.92	0.92	0.94

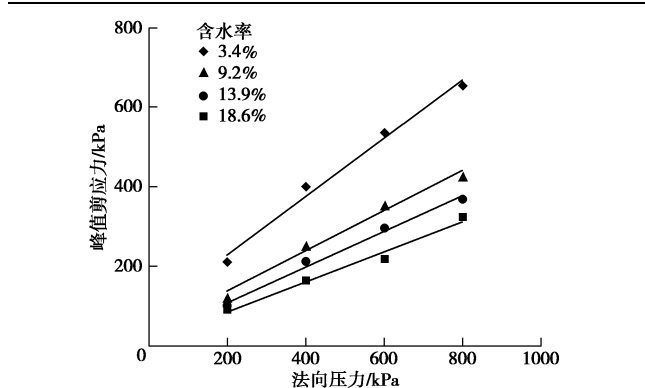


图 9 土石混合体抗剪强度的线性拟合

Fig. 9 Linear fitting of shear strength of SRA

由图 9 中的抗剪度包络线可得到土石混合体的黏聚力和内摩擦角, 如图 10 所示。随着含水率的增大, 黏聚力和内摩擦角都逐渐降低, 通过拟合发现黏聚力 c 、内摩擦角 φ 与含水率 w 都满足幂函数关系:

$c = 356.77w^{-1.102} \quad (R^2 = 0.96) \quad , \quad (4)$

$\varphi = 53.230w^{-0.312} \quad (R^2 = 0.99) \quad . \quad (5)$

李维树等^[11]通过试验亦发现三峡库区某土石混合体的 c , φ 与 w 满足幂函数关系。

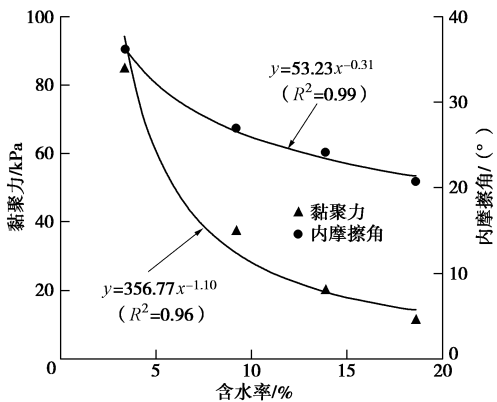


图 10 强度参数与含水率的关系

Fig. 10 Relationship between strength parameters and moisture content

黏聚力主要由细粒土中的黏土颗粒之间的相互引力、结合水膜联接力等组成^[19]。当含水率较小时,黏土颗粒间的水分主要为强结合水,导致颗粒之间的引力和结合水膜联接力较大,使得黏聚力较高;当含水率较大时,黏土颗粒间的水分主要为外层结合水,导致颗粒间的引力和结合水膜联接力都急剧下降,进而黏聚力急剧下降;内摩擦角主要是由颗粒之间的咬合力和滑动摩擦力组成^[19]。前面分析得到,含水率越高,颗粒间的接触力越小,因而咬合力越小,导致内摩擦角越小。此外,水的润滑作用亦能降低颗粒间的滑动摩擦力,从而起到降低内摩擦角的效果。

(2) 非线性强度特性

文献[20, 21]指出,堆石料具有非线性强度特性,其峰值摩擦角 φ_p 随围压 σ_3 增加而降低,且满足

$\varphi_p = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3 / p_a) \quad , \quad (6)$

式中, p_a 为标准大气压强, φ_0 为 $\sigma_3 = p_a$ 的峰值内摩擦角, $\Delta\varphi$ 为 σ_3 增大一个数量级时峰值内摩擦角 φ_p 降低的幅度, $\Delta\varphi$ 越大,非线性特性越强。

参考式(6),同时考虑黏聚力 c 对强度的贡献,利用非线性强度公式(7),对本文土石混合体的试验数据进行拟合,结果如表 5 和图 11 所示。

$\tau = c_0 + \sigma_n \tan[\varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_n / p_a)] \quad . \quad (7)$

表 5 非线性强度公式(7)的拟合结果

Table 5 Fitting results by nonlinear strength function (7)				
含水率 $w/\%$	c_0/kPa	$\varphi_0/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	R^2
3.4	21.12	49.72	5.30	0.96
9.2	15.36	34.18	2.99	0.97
13.9	12.34	27.72	1.58	0.97
18.6	5.13	21.79	0.30	0.95

表 5 中的相关系数 R^2 均大于 0.95, 大于表 4 中的线性函数拟合的相关系数, 表明非线性强度公式(7)能更准确地描述本文土石混合体的强度特性。

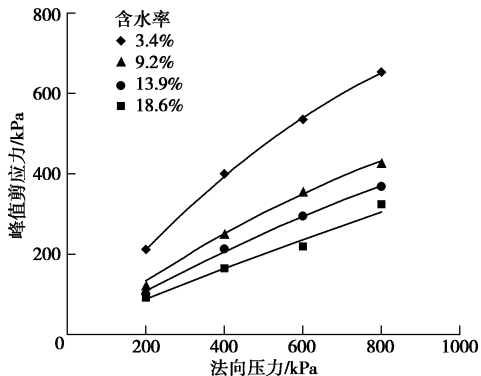


图 11 土石混合体抗剪强度的非线性拟合

Fig. 11 Nonlinear fitting of shear strength of SRA

由式(7)和表 5 可知,对于含水率相同的土石混合体,其峰值内摩擦角 φ_p 随着法向压力 σ_n 的增大而降低,具有非线性强度特性。这与土石混合体的颗粒破碎有关。因为土石混合体的内摩擦角主要源于颗粒表面的滑动摩擦和颗粒间的咬合摩擦两部分^[19]。滑动摩擦与颗粒本身的性质及颗粒间的接触有关,对于同一土石混合体,含水率不变时,滑动摩擦可认为不变;咬合摩擦与颗粒的大小、形状等有关,当颗粒发生破碎时,粒径减小,从而导致咬合摩擦减小。由式(3)和图 7 可知,法向压力 σ_n 越大,颗粒相对破碎率 B_r 越高,造成了峰值内摩擦角 φ_p 随着法向压力 σ_n 的增大而降低。

此外,由表 1 可知,土石混合体颗粒破碎后的含石量 P_5 随着法向压力 σ_n 的增大而减小,而较多文献[5~10]证明含石量 P_5 降低时,土石混合体的内摩擦角亦降低。这从侧面上证明了峰值内摩擦角 φ_p 随法向压力 σ_n 增大而降低的非线性强度特性与颗粒破碎有关。

将式(3)带入式(6),得到土石混合体的峰值内摩擦角 φ_p 与颗粒相对破碎率 B_r 的关系式:

$\varphi_p = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \left[(a + be^{fw}) \frac{B_r}{1 - B_r} \right] \quad . \quad (8)$

由式(8)可知,峰值内摩擦角 φ_p 随着颗粒相对破碎率 B_r 的增大而降低。

由图 11 和表 5 还可发现,含水率 w 越大,拟合曲线越直、 $\Delta\varphi$ 越小,即土石混合体的强度非线性特性越弱。因为含水率越大,颗粒相对破碎率 B_r 越小,式(3)和图 7 亦证明此点。

3 结 论

(1) 土石混合体剪切后的颗粒破碎较明显,可分

为完全剪断型、表面破裂型和表面研磨型3类。颗粒破碎造成粗粒组含量降低、细粒组含量增加、中等粒组含量波动变化、含石量 P_5 降低、级配曲线上移。颗粒破碎本质上是颗粒间接触力作用产生应力集中的结果,接触力越大,越容易破碎。法向压力 σ_n 越大或含水率 w 越低时,颗粒间接触力越大,颗粒相对破碎率 B_r 越高; B_r 与 σ_n 、 w 之间可用二元函数关系进行拟合。

(2) 含水率对土石混合体的破坏模式影响较大,低含水率出现应变软化破坏、高含水率出现应变硬化破坏、中等含水率近似塑性应变破坏。这主要是因为含水率改变了颗粒间的有效接触力和接触状态,进而改变了剪切时颗粒的破碎程度,最终导致不同破坏模式的出现。

(3) 剪应力-剪切位移关系曲线的初始段总是稳定增长的;而初始段过后,曲线出现幅度不一的“跳跃”,可分为“V”型跳跃和“陡升”型跳跃。因为初始段主要为剪密和连续体变形;初始段过后,颗粒开始破碎、转动和翻越。含水率越大,颗粒相对破碎率 B_r 越低,导致低含水率时以“V”型跳跃为主,高含水率时“陡升”型跳跃增多。法向压力越大,颗粒咬合力越大,其破碎时释放的咬合力越大,造成最大跳跃幅度越大。

(4) 随着含水率 w 的增大,土石混合体的抗剪强度 τ 、剪切模量 $G_{0.02}$ 、黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 均降低,其中 c 、 ϕ 与 w 都可用幂函数拟合,说明水对土石混合体具有软化作用。黏聚力 c 降低主要由结合水膜联接力降低引起;内摩擦角 ϕ 降低主要由咬合摩擦和滑动摩擦降低引起。

(5) 颗粒破碎造成土石混合体的强度具有非线性特征,其峰值摩擦角 ϕ_p 随法向压力 σ_n 增加而降低,且可用非线性强度公式拟合,含水率越高,强度非线性越弱。

参考文献:

- [1] 钟祖良,涂义亮,何晓勇,等. 土石混合体物理指标及强度特性研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 952 - 961. (ZHONG Zu-liang, TU Yi-liang, HE Xiao-yong, et al. Research progress on physical index and strength characteristics of bimsoils[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 952 - 961. (in Chinese))
- [2] 张坤勇. 土石混合料路基填筑关键技术[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(B06): 409 - 411. (ZHANG Kun-yong. The key technology for filling subgrade using soil-rock aggregate[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(B06): 409 - 411. (in Chinese))
- [3] 李 晓, 廖秋林, 赫建明, 等. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2377 - 2384. (LI Xiao, LIAO Qiu-lin, HE Jian-ming, et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2377 - 2384. (in Chinese))
- [4] COLI N, BERRY P, BOLDINI D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterization of a bimrock (BimTest)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48: 95 - 102.
- [5] 舒志乐, 刘保县, 梁宁慧, 等. 基于数字图像处理的土石体粗料分形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 511 - 516. (SHU Zhi-le, LIU Bao-xian, LIANG Ning-hui, et al. Study on the fractal characteristics of earth-rock coarse grain based on digital image processing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 511 - 516. (in Chinese))
- [6] 舒志乐, 刘新荣, 刘保县. 基于分形理论的土石混合体强度特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2652 - 2656. (SHU Zhi-le, LIU Xin-rong, LIU Bao-xian. Study of strength properties of earth-rock aggregate based on fractals[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2652 - 2656. (in Chinese))
- [7] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 996 - 1007. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 996 - 1007. (in Chinese))
- [8] 田恒蛟, 薛亚东. 路用土石混合料的剪切特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 10(1): 30 - 35. (TIAN Heng-jiao, XUE Ya-dong. Experimental search on shear behavior of soil-rock mixture for road construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 10(1): 30 - 35. (in Chinese))
- [9] KALENDER A, SONMEZ H, MEDLEY E. An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrock sand bimsoils[J]. Engineering Geology, 2014, 183: 65 - 79.
- [10] 魏厚振, 汪 稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48 - 57. (WEI Hou-zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength

- behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 48 - 57. (in Chinese))
- [11] 李维树, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(7): 1338 - 1342. (LI Wei-shu, DING Xiu-li, WU Ai-qing, et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges Reservoir bank slopes under influence of impounding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(7): 1338 - 1342. (in Chinese))
- [12] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 4065 - 4072. (DENG Hua-feng, YUAN Xian-fan, LI Jian-lin, et al. Research on failure characteristics and determination method for shear strength of soil-rock aggregate in direct shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 4065 - 4072. (in Chinese))
- [13] 徐文杰, 胡瑞林, 曾如意. 水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 814 - 818. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, ZENG Ru-yi. Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 814 - 818. (in Chinese))
- [14] XU W J, HU R L, TAN R J. Some geomechanical properties of soil-rock mixtures in Tiger-leaping Gorge Area, China[J]. Géotechnique, 2007, **57**(3): 255 - 264.
- [15] 王江营, 曹文贵, 张超. 基于正交设计的复杂环境下土石混填体大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1849 - 1856. (WANG Jiang-ying, CAO Wen-gui, ZHANG Chao. Large-scale direct shear tests on soil-rock aggregate mixture under complicated environment based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1849 - 1856. (in Chinese))
- [16] LADE P V. Assessment of test data for selection of 3-D failure criterion for sand[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, **30**: 307 - 333.
- [17] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [18] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [19] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [20] 张坤勇, 殷宗泽, 朱俊高. 堆石坝坝坡非线性稳定性分析[J]. 西部探矿工程, 2006, **18**(21): 212 - 215. (ZHANG Kun-yong, YING Zong-ze, ZHU Jun-gao. Analysis of nonlinear stability of slope in Rock-fill dam[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, **18**(21): 212 - 215. (in Chinese))
- [21] 陈生水. 土石坝试验新技术研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 1 - 28. (CHEN Sheng-shui. Experimental techniques for earth and rockfill dams and their applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 1 - 28. (in Chinese))